



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOS ENERGETIKA TANSZÉK**

KOMPLEX SZIGETELÉSDIAGNOSZTIKA ALKALMAZÁSA KISFESZÜLTSGŰ KÁBELEKRE

TÉZISFÜZET

TAMUS ZOLTÁN ÁDÁM

KONZULENS:

DR. BERTA ISTVÁN EGYETEMI TANÁR

BUDAPEST, 2010.

1 BEVEZETÉS

A legtöbb – a villamosenergia-termelésben és elosztásban résztvevő – villamos berendezésnek az üzembiztonság szempontjából legérzékenyebb pontja a szigetelés. A bekövetkező üzemavarok gyakori oka a berendezések és a kábelek szigetelésének külső behatások következtében való elöregedése. A berendezések „asset management”-je során megalapozott döntés csak a készülékek pontos állapotának ismeretében hozható, állapotuk csak rendszeres diagnosztikai vizsgálatokkal követhető nyomon.

A korszerű elektrotechnikában már sokféle szigetelőanyag áll rendelkezésre a berendezéseket, a kábeleket és a kábelszerelvényeket tervező mérnök számára, és a szigetelésekkel szemben támasztott növekvő igényekre egyre újabb, de komplexebb anyagokkal válaszol a vegyipar. A tapasztalat azt mutatja, hogy a korábban használt diagnosztikai módszerek nem alkalmasak a korszerű szigetelőanyagokból készült szigetelések megbízható állapotfelmérésére. Ennek magyarázata abban keresendő, hogy a szigetelések öregedése lassú folyamat, évtizedekben mérhető, ezért szükségszerű, hogy szigetelésdiagnosztika mindig csak követi az új szigetelőanyagok megjelenését. Így a korszerű szigetelőanyagok vizsgálatára is – jobb híján – a már meglévő, hagyományos diagnosztikai módszereket alkalmazzuk, holott a különféle szigetelőanyagok öregedésének hátterében más-más kémiai reakciók állnak. A különféle kémiai folyamatok az egyes anyagok más-más fizikai paramétereit változtatják, tehát más fizikai jellemzők változnak az anyag öregedésével. Ellentmondást okoz, hogy a hagyományos vizsgálatokkal ugyanazokat a fizikai jellemzőket vizsgáljuk, és legtöbbször ugyanazon küszöbértékek alapján értékeljük a szigetelések állapotát, gyakran téves diagnosztikai döntéseket hozva.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék, Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoportján évtizedek óta foglalkoznak szigetelésdiagnosztikával, Eisler János, Csernátóny-Hoffer András, Horváth Tibor és Németh Endre munkásságának eredményei ma is egyedülállóak a világban. Jelenleg intenzív kutatómunka folyik a Paksi Atomerőmű Zrt.-vel és az E.ON Hungária Zrt.-vel együttműködve. Ennek egyik eredménye a doktori értekezés témájául szolgáló újszerű komplex megközelítési mód a szigetelésvizsgálatban.

2 CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésben a komplex diagnosztika módszerével foglalkozom, amely alkalmas a szigetelésdiagnosztika hagyományos megközelítéséből származó ellentmondás feloldására. A komplex szigetelésdiagnosztika az anyagból, az anyag jellemző öregedési folyamataiból indul ki, majd az öregedési folyamatok eredményeként megváltozó paraméterekhez, forszírozott laboratóriumi öregítési vizsgálatsorozattal keres küszöbértékeket, melyek jelzik, ha a szigetelés biztonságos üzemeltetésének határára ér.

Az értekezés a szerző által kidolgozott – a komplex igénybevételeknek kitett komplex szigetelések vizsgálatára alkalmas – komplex (sorozatosan, és egyidejűleg alkalmazott kémiai, mechanikai és villamos diagnosztikai eljárásokból felépített), helyszíni, roncsolásmentes diagnosztikai rendszert és annak eredményeit mutatja be.

3 AZ ÉRTEKEZÉS ÁTTEKINTŐ BEMUTATÁSA

Az értekezés első felében áttekintem a kábeldiagnosztikában jelenleg leggyakrabban használt módszereket, ismertetem a módszerek elméleti alapjait. Majd áttekintem azokat a problémákat, amelyek a jelenlegi módszerek alkalmazását megnehezítik kisfeszültségű kábelek vizsgálatakor.

Részletesen bemutatom az általam megalkotott komplex szigetelésdiagnosztika módszertanát. Kifejtem, hogy a komplex diagnosztika segítségével hogyan határozhatók meg a kisfeszültségű PVC szigetelésű kábelek vizsgálatára legalkalmasabb módszerek, valamint a hozzájuk tartozó – a kábelek élettartamának végét jelző – küszöbszámok.

A modellszámítások eredményei alapján olyan következtetéseket vonok le, amelyekkel a feszültségválasz módszer alkalmassá tehető polietilén kábelek állapotának vizsgálatára, az eredményeket kísérletileg is igazolom.

A vegyes (olaj-papír és PE) kábelszakaszok egyszerűsített villamos modelljének felhasználásával kidolgoztam egy olyan mérési eljárást, amivel a vegyes kábelszakaszok olaj-papír szigetelésű részének állapota meghatározható. Az eredményeket laboratóriumi mérésekkel is igazoltam.

4 TÉZISEK

1. tézis

Komplex szigetelésdiagnosztikai rendszert dolgoztam ki, amely alkalmas a napjainkban használt különféle szigetelőanyagokból felépített kisfeszültségű kábelek állapotának eddigieknél hatékonyabb nyomonkövetésére. A hatékonyságot az adott kábeltípus öregeedésére legérzékenyebb, roncsolásmentes, helyszíni és szükséges legkevesebb elvégzendő vizsgálat kiválasztására kidolgozott eljárással biztosítom, ami különféle – esetenként párhuzamos – igénybevételekkel végzett sorozatos laboratóriumi öregítő eljárásokat, valamint villamos, mechanikai és kémiai-anyagszerkezeti vizsgálatok párhuzamos együttesét alkalmazó komplex szigetelésdiagnosztikai rendszer. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]

Korábban a kisfeszültségű kábelek állapotfelmérése nem volt alapvető kérdés a szigetelésvizsgálattal foglalkozó szakemberek számára, hiszen a kisfeszültségű kábelek ára, valamint azok cseréjéhez kapcsolódó egyéb járulékos költségek jóval alacsonyabbak, mint a közép- és nagyfeszültségű kábeleké. Korábban a kisfeszültségű kábeleket állapotvizsgálat nélkül kicserélték egy adott létesítmény rekonstrukciója során. Ebben a szemléletben csak a legutóbbi időkben állt be változás, amikor az erőművek, különösen az atomerőművek megújítása (működési idő meghosszabbítása), műszaki és gazdasági szempontból is világszerte szükségessé vált. A legtöbb közép- és nagyfeszültségű kábeldiagnosztikára kifejlesztett módszer nem alkalmazható kisfeszültségű kábelekre, ugyanis ezen módszerek vizsgálófeszültsége általában meghaladja a kisfeszültségű kábelek névleges feszültségét, gyakran a kábelgyártáskor használt próbafeszültséget is. Éppen ezért a jelenleg használt vizsgálatok főként a kisfeszültségű kábelek mechanikai paramétereit vizsgálják, amelyek roncsolásos vizsgálatok.

Ezen ellentmondásos helyzet feloldására alkalmas az általam kidolgozott **komplex szigetelésdiagnosztikai rendszer**, amelynek alkalmazásával meghatározhatjuk egy adott kisfeszültségű kábel vizsgálatára alkalmas roncsolásmentes módszerek együttesét.

Első lépés a szigetelést érő igénybevételek meghatározása, majd ennek alapján a gyorsított laboratóriumi öregítéssel végzett vizsgálatok végrehajtása. Második lépésként a párhuzamosan végzett kémiai, fizikai és villamos vizsgálatok eredményeként meghatározhatóak a legjellemzőbb degradációs folyamatok, és harmadik lépésben az öregedést legérzékenyebben jelző paraméterek. A vizsgálat negyedik lépéseként a vizsgált paraméternek a szigetelés élettartamá-

nak végét jelző küszöbértékét kell ciklikus öregítéses vizsgálatokkal meghatározni. Az ötödik lépés a roncsolásmentes, helyszíni mérések végzésére alkalmas mérési eljárás kidolgozása.

Az általam kidolgozott komplex szigetelésdiagnosztikai rendszer tehát egy új komplex szemléletmódot vezet be, mely szerint komplex az igénybevétel, komplex a szigetelés, amelyben komplex folyamatok játszódnak le az öregedés hatására, tehát komplex vizsgálatok szükségesek a szigetelések állapotmeghatározására is.

Összefoglalva, **a komplex diagnosztika során először megállapítjuk a szigetelőanyag jellemző öregedési folyamatait, majd meghatározzuk az öregedési folyamatok eredményeként megváltozó fizikai paramétereiket, és végül küszöbértéket határozzunk meg a jellemző fizikai paraméterekre, melyek jelzik, ha a szigetelés biztonságos üzemeltetésének határára ér.**

2. tézis

A teljes feszültségválasz módszert továbbfejlesztve komplex szigetelésdiagnosztikai módszert dolgoztam ki PVC szigetelésű kábelekre. Felismertem és bizonyítottam, hogy a PVC szigetelésű kábeleken mért kisülési feszültség kezdeti meredekségének növekedése arányos a kábelszigetelés termikus öregedésével. Bizonyítottam, hogy e meredekség – az öregítéses vizsgálatok eredményeként megadható értéket meghaladva – jelzi a kábel átütési feszültségének csökkenését, illetve a szigetelőképeségnek a közeli jövőben várható összeomlását. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]

Többlépcsős komplex szigetelésdiagnosztikai vizsgálatot végeztem kiefeszültségű PVC szigetelésű kábelmintákon. A vizsgálat első lépcsőjében több kémiai (hőstabilitás, DSC), több mechanikai (sűrűség, gélesedési fok, szakító, hajlító, keménység, illetve indenteres) és több villamos (szivárgási áram, veszteségi tényező, feszültségválasz és átütéses) vizsgálatot végeztem párhuzamosan. Az első lépcső eredményeként megállapítottam, hogy a kiefeszültségű PVC kábelek öregedését legérzékenyebben a hőstabilitás, a keménység, a veszteségi tényező és a feszültségválasz változása jelzi.

A második lépcsőben ciklikus, laboratóriumi öregítéses vizsgálati rendszert építettem fel a hőstabilitás, a keménység, a veszteségi tényező és a feszültségválasz mérési eredményeihez tartozó, az élettartam végét jelző küszöbszámok meghatározására. Megállapítottam, hogy a PVC szigetelésű kiefeszültségű kábelek termikus öregedése roncsolásmentesen követhető a

feszültségválasz mérés módszerével, a kisülési feszültséggörbe kezdeti meredeksége az öregítési ciklusok során növekedett. **A kisülési feszültséggörbe kezdeti meredeksége, mint jellemző vizsgálatával, a PVC szigetelésű kábelek termikus öregedése nyomon követhető.**

3. tézis

Felismertem, hogy a teljes feszültségválasz mérésén alapuló szigetelésdiagnosztikai módszer korszerű polietilén (PE) kábeleken való alkalmazhatósága a szigetelőanyag kiváló szigetelő tulajdonságai miatt korlátozott. A teljes feszültségválasz módszert továbbfejlesztve, öregítési vizsgálatot végeztem polietilén és térhálósított polietilén szigetelésű kábelmintákon. Kidolgoztam egy – a mérőrendszer villamos paramétereit (feszültségválaszt és kapacitását) figyelembe vevő – korrekciós eljárást, mellyel a teljes feszültségválasz mérés módszere alkalmassá tehető a laboratóriumi vizsgálatoknál használt kis hosszúságú polietilén kábelminták vizsgálatára. [Tamus 2009b, 2009c], [Tamus, Berta 2010]

A teljes feszültségválasz mérésén alapuló szigetelésvizsgálati módszernél az alapfeltevés az, hogy a szigetelés feltöltése, majd rövidre zárása után megjelenő visszatérő feszültség jelleggörbáját csak a szigetelés vezetési és polarizációs folyamatai határozzák meg. A gyakorlatban azonban ez nem valósítható meg, mivel a mérőrendszer szigetelési ellenállása és kapacitása befolyásolja a mérést. Németh Endre megállapította, hogy ha a mérőrendszer szigetelési ellenállása legalább két nagyságrenddel meghaladja a vizsgálandó szigetelés szigetelési ellenállását, valamint ha a mérőrendszer kapacitása két nagyságrenddel kisebb, mint a vizsgálandó szigetelés kapacitása, akkor már a mérőrendszer hatása elhanyagolható. Az általa kidolgozott korrekciós eljárás csak a vizsgáloberendezés kapacitását veszi figyelembe.

A probléma megoldására a szigetelés és a mérőrendszer egyszerűsített matematikai modelljét felhasználva kidolgoztam egy korrekciós eljárást, mellyel a mérőrendszer feszültségválaszának és kapacitásának ismeretében, a mérőrendszer által okozott hiba korrigálható. A matematikai modell használhatóságát laboratóriumi mérésekkel igazoltam.

A megoldás jelentősége abban áll, hogy a korrekcióhoz nem szükséges a mérőrendszer szigetelési ellenállásának ismerete, elegendő csupán a mérőrendszer kapacitásának meghatározása, valamint a mérés előtt a mérőrendszert magára hagyva meg kell mérni a kisülési és a visszatérő feszültség kezdeti meredekségeit.

4. tézis

Az olaj-papír és polietilén szigetelésű kábelszakaszokból álló, vegyes kábelek olaj-papír szigetelésű szakaszának állapota a teljes feszültségválasz mérésével nem határozható meg. Az általam kidolgozott korrekciós eljárással, a vegyes kábelvonalon végzett teljes feszültségválasz mérés módszerével kimutatható az olaj-papír szakasz előrehaladott elöregedése, ha az olaj-papír szakasz hossza egy adott tartományba esik. [14, 15]

A vegyes kábelvonalak diagnosztikájának egyik lehetséges módja az Oszcilláló hullámú részkiülés vizsgálat. Ez egy szelektív részkiülés vizsgálati módszer, mely a kábelvonalon a részkiülések által létrehozott haladóhullámok vizsgálatával alkalmas a részkiülés helyének és intenzitásának meghatározására. Ez a módszer nem alkalmas már elnedvesedett szakaszok vizsgálatára, mert az elnedvesedett szakaszokban nem jönnek létre részkiülések, ugyanis a nedvesség kitölti az üregeket. Továbbá, az elnedvesedett szakasz csillapítása már akkora lehet, hogy a részkiülések által létrehozott haladóhullámokat teljesen elnyeli. Így az elnedvesedett kábelszakaszok Oszcilláló hullámú részkiülés vizsgálati módszerrel történő vizsgálata már nem lehetséges.

A teljes feszültségválasz módszer nem szelektív mérési mód, ezzel a módszerrel a szigetelés lokális hibái nem detektálhatók, de a szigetelés általános öregedése igen.

Kidolgoztam a vegyes kábelszakaszokon végzett teljes feszültségválasz matematikai modelljét. A matematikai modell alapján kidolgoztam egy korrekciós eljárást, amellyel a teljes feszültségválasz módszer szelektivitása megnövelhető, így már mérhetővé válik az olaj-papír szakaszok termikus öregedése és nedvesedése. A korrekciós eljárás azon alapszik, hogy a korszerű (térhálósított)polietilén kábelszigetelések kiülési és visszatérő feszültségének kezdeti meredeksége az öregedés során sokkal kisebb mértékben növekszik, mint az olaj-papír szigetelésé. A kidolgozott korrekciós eljárással, két párhuzamosan kapcsolt szigetelésen mért eredő feszültségválaszából meghatározható az egyes szigetelések feszültségválasza, ha az egyik szigetelés feszültségválasza egy ismert, szűk tartományban van. Ehhez a korrekcióhoz, csak a két szigetelés kapacitásának ismeretére van szükség. E módszer előnye, hogy a szigetelések öregedése során a kapacitás változása elhanyagolható.

A kapott eredményeket az általam felépített vegyes szigetelésű kábelvonal modellen végzett mérésekkel igazoltam.

5 A TÉZISEK TÉMAKÖRÉT KÖZVETLENÜL ÉRINTŐ KÖZLEMÉNYEK

[1] TAMUS Z. Á., CSELKÓ R., BERTA I.: *Partial Discharge Measurement in Low Voltage Cable Diagnostics*, 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2008, Quebec City, Canada, 2008.10.26-2008.10.29. pp. 463-466.

[2] TAMUS Z. Á., CSELKÓ R., BERTA I.: *Application of partial discharge measurement on laboratory aged low voltage cables*, EIC 2009, Proc. 29th IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada, 2009.05.31-2009.06.03. pp. 220-223. Paper 12-3

[3] KÓHALMY S., KISS I., TAMUS Z. Á., NOVÁK B.: *Examination of tree formation in silicone rubber*, INSUCON 2009, Proc. International Electrical Insulation Conference. Birmingham, Anglia, 2009.05.26-2009.05.28. pp. 270-272.

[4] TAMUS Z. Á., NÉMETH B., KISS I., CSELKÓ R., BERTA I.: *Complex Examination of a Cable Terminal Failure*, International Symposium on Electrical Insulation, IEEE ISEI 2008. Vancouver B.C., Canada, 2008.06.08-2008.06.11. pp. 47-49.

[5] CSELKÓ R., TAMUS Z. Á., SZABÓ A., BERTA I.: *Comparison of Acoustic and Electrical Partial Discharge Measurements on Cable Terminations*, Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation ISEI 2010, San Diego, CA, 2010.06.06-2010.06.09. Paper 196.

[6] NÉMETH E., TAMUS Z. Á.: *Villamos szigetelések diagnosztikája*, Nemzetközi Energetikai és Elektrotechnikai Konferencia, ENELKO 2005. Kolozsvár, Románia, 2005.10.07-2005.10.09. pp. 110-115.

[7] TAMUS Z. Á., NÉMETH E.: *Measurement of Dielectric, Mechanical and Chemical Properties of the Insulation in Cable Diagnostic*, 15th International Conference on High Voltage Engineering, ISH 2007, Aug. 26-31. Ljubljana, SLOVENIA

[8] TAMUS Z. Á.: *Complex Diagnostics of Insulating Materials in Industrial Electrostatics*, Journal of Electrostatics, Volume 67, Issues 2-3, May 2009, Pages 154-157

[9] TAMUS Z. Á., NÉMETH E.: *Condition Assessment of PVC Insulated Low Voltage Cables by Voltage Response Method*, 2010 Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2010. Tokyo, Japan, 2010.09.06-11., pp. 721-724. Paper P1-17

[10] TAMUS Á., IVÁNCZY T., KISS I., BERTA I.: *Improved modelling of impulse mode ESP energization*, J. Phys.: Conf. Ser. 142 (2008) 012034 (4pp) Published online: 22 December 2008

[11] TAMUS Z. Á., NÉMETH B., BERTA I.: *Effect of Voltage Stress on Diagnostic Parameters of Low Voltage Cables*, International Symposium on Electrical Insulation, IEEE ISEI 2008, 8-11 June 2008., Vancouver B.C., CANADA

[12] TAMUS Z. Á., BERTA I.: *Application of Voltage Response Measurement on Low Voltage Cables*, EIC 2009, Proc. 29th IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada, 31/May/2009-03/Jun/2009. pp. 444-447. Paper 20-4. (ISBN:978-1-4244-3916-4)

[13] TAMUS Z. Á.: *Considerations for the Application of Voltage Response Method on Polymeric Insulated Cables* IYCE 2009 Proc. 2nd International Youth Conference on Energetics Budapest, Hungary, 04/Jun/2009-06/Jun/2009. Paper 5B-3.

[14] TAMUS Z. Á.: *Cable Diagnostics by Voltage Response Measurement*, CIGRE SC D1 – Colloquium in Hungary, Budapest 2009 Sept. 20-25 2009., Paper: D1-243

[15] TAMUS Z. Á., BERTA I.: *Condition Assessment of Mixed Oil-paper and XLPE Insulated Cable Lines by Voltage Response Method*, 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Diego, CA, USA, 2010.06.06-08. Paper 198